

〈논 문〉

# ER 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지된 고속 회전 로터의 동적 계수에 관한 연구

## Dynamic Coefficients of a High-Speed Rotor Supported by a Slotted ER Squeeze Film Damper

이용복\* · 김창호\* · 정시영\*\* · 이남수\*\*\* · 최동훈\*\*\*\*

Yong-Bok Lee, Chang-Ho Kim, Si-Young Jung, Nam-Soo Lee and Dong-Hoon Choi

(2000년 8월 16일 접수 ; 2000년 11월 3일 심사완료)

**Key Words:** ER Squeeze Film Damper(전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼), Dynamic Coefficient(동적 계수), Instrumental Variable Method (IVM), Least Square Method(최소 자승법)

### ABSTRACT

A new electro-rheological squeeze film damper (ER-SFD) has been sealed with slotted piston rings which have electrodes at the inside of the constant gap. The slotted ER-SFD can prevent the problem of electric discharge which might be occurred in the previous configuration of an ER-SFD. The current paper presents the extraction of linearized dynamic coefficients within small orbit where these coefficients are controlled by the application of electric strength. Test rig has been modified to isolate the damper section for dynamic coefficient extraction. The results show that rotordynamic coefficients, damping and inertia terms, increase with increasing supply voltages, while stiffness coefficients decrease with increasing supply voltages. Rotating speed of rigid shaft does not affect these coefficients.

### 1. 서 론

고속 회전 기계용 감쇠장치 가운데 스퀴즈 필름 댐퍼는 구조가 단순하면서도 감쇠성능이 우수하다. 이러한 SFD는 가스터빈 항공 엔진용으로 개발되어 현재까지 고속회전기계의 감쇠장치로서 우수한 성능을 인정 받고 있지만 부적절히 설계하면 오히려 회전기계의 축 진동을 더욱 악화시키는 결과를 초래하여 사용범위에 제한을 받고 있다<sup>(1~4)</sup>. 한편 지능재료의 일종인 ER유체가 여러 가지 기계요소의 성능향상과 진동제어에 활용되어 그 실용성을 인정 받으면서, 회전체 역학과 윤활공학 분야에서도 ER유체의 응용연구가 활발히 진행되고 있다<sup>(5~7)</sup>. 특히 고속회전체의 축 진동 감쇠장치에 ER유체를 적용하는 이론적 및 실험적 연구

가 수행되어 축진동 감쇠성능을 크게 향상시킬 수 있음이 밝혀진 바 있다<sup>(8~11)</sup>. 그러나 현재까지 연구된 ER-SFD의 대부분은 댐퍼 저널과 하우징 사이의 틈새, 즉 유막 간극을 전기장 간극으로 활용하고 있다. 이러한 구조는 전기장 간극의 크기가 변화하기 때문에, 특히 저널의 편심율이 클 때는 최소 간극에서 전기적 단락현상이 쉽게 발생하여 그 기능을 일시에 상실하고 고속회전기계에 치명적 손상을 발생시킬 수 있는 위험성이 존재한다. 따라서 Kim<sup>(12)</sup> 등은 이러한 ER SFD의 단락의 위험성을 제거하여 고속회전기계에 실제 적용할 수 있을 뿐만 아니라 ER유체의 장점을 활용할 수 있는 Slotted ER SFD(Fig.1)를 개발하였고, Lee<sup>(13)</sup> 등은 외부 가압, slotted ring 형태를 갖는 ER SFD로 지지되는 연성 로터의 임계속도 제진에 대한 연구를 수행하였다. 불 평형력에 기인한 진동은 외부 가압하는 압력의 크기, 전기 유변 유체에 가해지는 전장의 세기 및 슬롯 부위의 전극(electrode)의 면적에 따른 감쇠 효과를 실험을 통하여 연구함으로써 설계 변수로서의 활용이 가능토록 하였다. 또한 Kim<sup>(14)</sup> 등은 슬롯 부위의 전장의 세기가 과

\* 정희원, 한국과학기술연구원 트라이볼로지연구센터

\*\* 정희원, 인하공업전문대학 항공기계과

\*\*\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\*\*\* 정희원, 한양대학교 기계설계학과

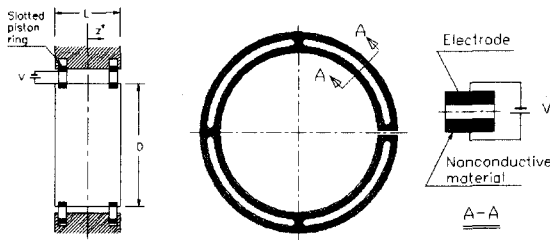


Fig. 1 Slotted ring ER SFD

도 할 경우 에너지의 비효율성 및 과도 전압에 따른 ER 유체입자의 크기에 기인한 전기적인 방전효과(discharge effect)가 발생하는 데 이를 방지하기 위하여 가해지는 전압의 크기를 퍼지 제어(fuzzy control)를 통하여 구현하였으며, 제진 효율에 따른 부가 전압의 최적화 연구를 통하여 ER SFD의 안정성을 연구하였다. 이제까지의 연구는 주로 SFD전반에 걸친 감쇠의 부가 방법 및 제어를 통한 축 진동의 제진에 주로 연구의 초점이 되어 왔다. 그러나 실제 시스템에 적용된 감쇠의 크기를 정량적으로 추출함으로써 정확한 시스템의 동적 거동의 예측이 필요 시 되고 있다.

따라서 본 논문에서는 ER 유체로 지지되는 감쇠기의 전압의 세기에 따른 동적 계수의 크기를 정량적으로 파악 할 수 있는 실험 장치를 구성하였다. 또한 선형 범위에서 운동하는 ER SFD의 동적 계수를 실험적으로 추출함으로써 추후 이론에 대한 시스템 모델의 정확성을 검증하는 자료로 사용하고자 하였다.

## 2. ER SFD 동적 파라미터의 추출

### 2.1 스퀴즈 필름댐퍼의 운동 방정식

스퀴즈 필름 댐퍼 저널과 베어링으로 되어있는 시스템의 수학적 모델은 댐퍼가 외부 가진력에 의하여 반경 방향으로만 움직이는 2자유도의 강제 운동을 한다고 가정 할 때 계의 선형화 된 운동방정식은 다음과 같게 된다<sup>(1)</sup>.

$$\begin{aligned} F_x &= -K_{xx}X - K_{xy}Y - C_{xx}\dot{X} - C_{xy}\dot{Y} - M_{xx}\ddot{X} - M_{xy}\ddot{Y}, \\ F_y &= -K_{yx}X - K_{yy}Y - C_{yx}\dot{X} - C_{yy}\dot{Y} - M_{yx}\ddot{X} - M_{yy}\ddot{Y} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $M_{i,j}$ ,  $C_{i,j}$ ,  $K_{i,j}$  는 각각 질량(mass), 감쇠(damping), 강성(stiffness) 계수를 나타내며, 하첨자  $i, j$  는 각각  $x, y$ 의 방향을 나타내며  $F_i$ 는 외부 가진에 의한 외력을 나타낸다. 이러한 선형화 된 식은 외력에 의한 미소 변위인  $x, y$ 가 매우 작은 경우 선형화가 가능하다. 또한 저널의 정적 편심 위치가 영(zero)이거나 자세각,

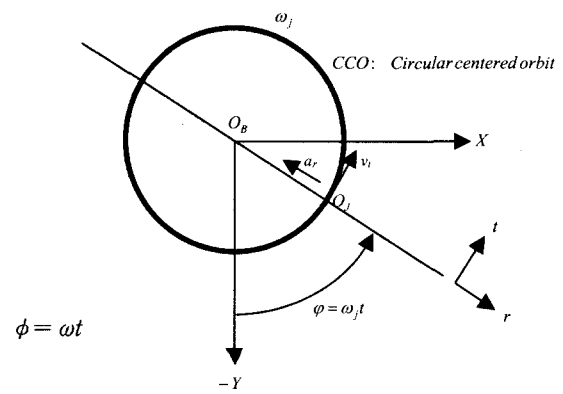


Fig. 2 Coordinates for a squeeze film damper executing a circular centered whirl orbit

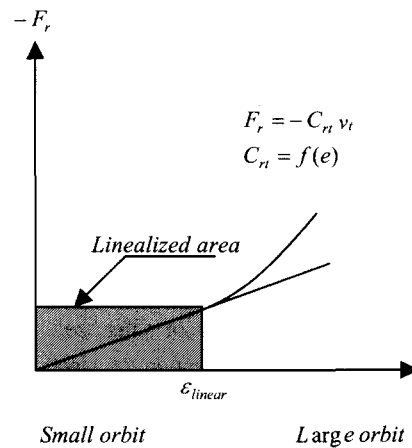


Fig. 3 Non-linear cross coupled damping coefficient for a squeeze film damper executing a circular centered whirl orbit

일 때에는 스퀴즈 저널은 유막의 압력을 발생 시키지 못한다. 특히 centering spring이 장착되어 있는 스퀴즈 필름 댐퍼의 경우 유막과 평행하게 운동을 한다. 그러므로 정적인 편심은 centering spring의 강성에 의하여 결정되어 지며 Fig. 2와 같이 댐퍼는 원형의 궤적(circular centered orbit, CCO)을 그리며 운동을 한다. 이 궤적이 작으면 위의 식 (1)의 적용은 SFD의 동적 해석에 적절하고 선형화 된 동적 계수인 행렬  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 는 비교적 실험을 통한 계수 추출에 무리가 없을 것이다.

일반적으로 Fig. 3에서와 같이 그 궤적이 작을 때는 계수 자체가 선형화 된 범위에서 나타내어 질 수 있으나, 궤적의 크기가 클 때는 비선형 운동에 따른 감쇠 계수 자체가 편심,  $e$ 의 함수가 된다.

### 2.2 선형화 된 스퀴즈 필름 댐퍼의 동적 계수

2자유도의 선형화 된 운동방정식 식 (1)은 가진력과 계의 응답 조건을 아래 식 (2)와 같이 조화함수라 가정하면

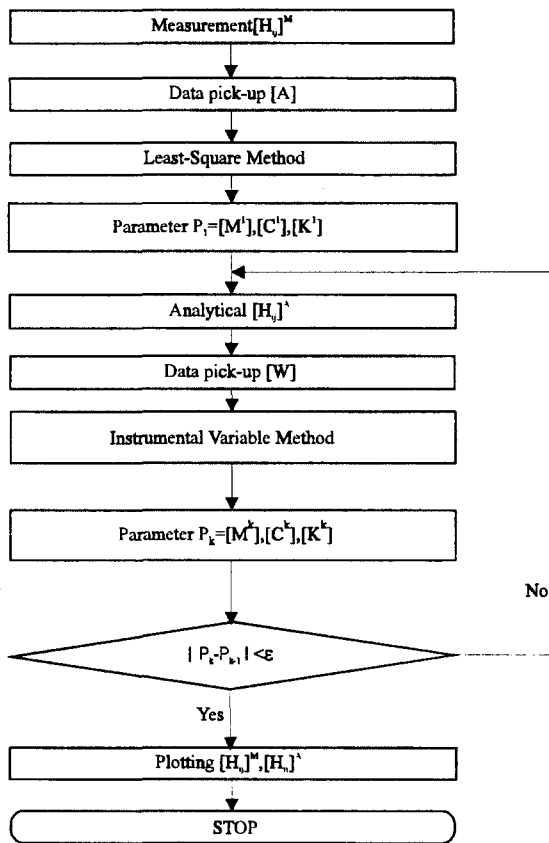


Fig. 4 Flow chart of parameter identification algorithm of slotted ER SFD by IVM

$$(x = X e^{j\omega t}, y = Y e^{j\omega t}, F_x = F_x e^{j\omega t}, F_y = F_y e^{j\omega t}) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} K_{xx} - \omega^2 M_{xx} + j\omega C_{xx} & K_{xy} - \omega^2 M_{xy} + j\omega C_{xy} \\ K_{yx} - \omega^2 M_{yx} + j\omega C_{yx} & K_{yy} - \omega^2 M_{yy} + j\omega C_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

식 (3)에 의해 Receptance matrix  $[H]$  (displacement /force)를 구하여 정리하면 하나의  $\omega$  성분에 대하여 실수와 허수부 각각 4개의 방정식으로 표현되며 이는 행렬 형태로 표시된다.

$$[A][X] = [E]' + [S]' \quad (4)$$

여기서  $[A]$ 는 가진 진동수  $\omega$ 와 F.R.F(frequency response function)의 함수로 이루어져 있으며  $[X]$ 는 미지의 계수  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$ 로 이루어져 있고 행렬  $[S]'$ 는 측정 오차 및 시스템에 미치는 외적 잡음에 대한 Euclidean norm 형태의 잡음 오차 행렬을 나타낸다.

$$[A] = \begin{bmatrix} H'_{xx} & H'_{xy} & -\omega^2 H'_{xx} & -\omega^2 H'_{xy} & -\omega H'_{xx} & -\omega H'_{xy} \\ H'_{yx} & H'_{yy} & -\omega^2 H'_{yx} & -\omega^2 H'_{yy} & -\omega H'_{yx} & -\omega H'_{yy} \\ H^i_{xx} & H^i_{xy} & -\omega^2 H^i_{xx} & -\omega^2 H^i_{xy} & -\omega H^i_{xx} & -\omega H^i_{xy} \\ H^i_{yx} & H^i_{yy} & -\omega^2 H^i_{yx} & -\omega^2 H^i_{yy} & -\omega H^i_{yx} & -\omega H^i_{yy} \end{bmatrix}$$

$$[X] = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \\ M_{xx} & M_{xy} \\ M_{yx} & M_{yy} \\ C_{xx} & C_{xy} \\ C_{yx} & C_{yy} \end{bmatrix} [E]' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

식 (4)를 정리하면 다음과 같다.

$$[A]^T [A][X] = [A]^T [E]' + [A]^T [S]' \quad (5)$$

$$[X] = ([A]^T [A])^{-1} ([A]^T [E]' + [A]^T [S]') \quad (6)$$

아울러 신호에 대한 잡음의 비가 클 경우 위에 기술한 최소자승 방법(least square method)과 함께 잡음에 둔감하고 오차를 줄일 수 있는 instrumental variable method (IVM)<sup>(15)</sup>를 Fig. 4와 같이 추가로 사용하는데 그 내용은 다음과 같다. 먼저 식 (6)에서 처음으로 구한  $[M]^a$ ,  $[C]^a$ ,  $[K]^a$ 로 해석적인 전달함수인 analytical receptance function  $H^a$ 를 구하고  $H^a$ 를 이용해서 행렬  $[W]^a$ 를 만든다. 이를 식 (5)에 대입하면 아래와 같이 다시 파라미터  $[X]$ 를 구할 수 있게 된다.

$$[W]^T [A][X] = [W]^T [E]' + [W]^T [S]' \quad (7)$$

### 3. Slotted ER SFD시스템

슬롯 피스톤-링 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼의 실험을 위하여 외팔 지지 강성 로터를 설계 제작하여 실험 장치를 구성하였으며 그 장치는 Fig. 5에 나타내었다. 댐퍼의 길이는 18 mm이고 직경은 100 mm, 댐퍼 및 슬롯의 틈새는 각각 1.0 mm로 하였다. 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 저널의 궤적을 측정하기 위해 ER SFD의 하우징에 90도 간격으로 2조의 변위센서를 설치하였다. 또한 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼에 공급되는 전기 유변성 유체의 압력을 측정하기 위해 전기 유변성 스퀴즈 필름 댐퍼 상단에 스트레인 게이지 타입의 압력센서를 설치하였으며, 공급 유체의 온도를 측정하기 위하여 열전대(thermocouple)를 이용하였다. 이상으로 열거한 각종의 센서로부터 측정되는 신호는 100 kHz의 샘플처리속도를 갖는 A/D변환기를 통하여 컴퓨터로 입력된다.

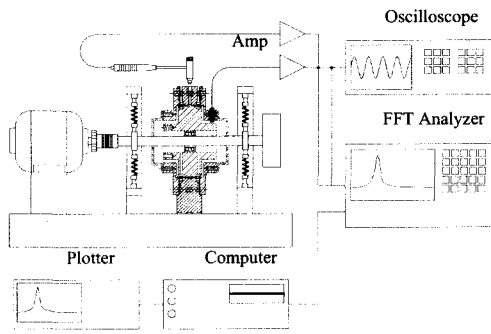


Fig. 5 Rotor system supported by slotted ER SFD, data acquisition and processing

일반적으로 기계 시스템의 파라미터를 정확히 추출하기 위한 고전적 방법으로는 주파수 영역에서의 접근이 있다. 이는 측정 데이터의 해석이 비교적 시 영역의 방법에 비하여 간단하나 선형계에 국한하여 적용된다. 반면에 시간 영역에서의 해석은 이러한 단점을 배제할 수 있으며 그 사용 방법으로는 Quasi-linearization, Invariant imbedding method, 그리고 Extended Kalman Filter 등이 있다. 본 논문에서는 시스템의 비선형화를 배제시키기 위하여 미소 변위에 따른 선형성이 유지되는 진동 범위에서의 ER SFD의 동특성을 파악하기 위하여 주파수 영역에서의 해석을 수행하였다.

#### 4. 동특성 파라미터의 추출 및 결과 분석

가변 전압에 따른 전기 유변성 유체만의 유막 특성을 살펴보기 위하여 먼저 유체의 유입이 없는 경우의 구조물에 대한  $M_{i,j}^0$ ,  $C_{i,j}^0$ ,  $K_{i,j}^0$ 를 구한다. 그리고 전기 유변성 유체의 유입 및 운전 속도에 따른 데이터를 추출하기 위하여 임펄스 햄머로 가진 후 그에 따른 전달함수를 측정하고, 최소 자승법에 의하여 동특성 계수를 추출한다. 일반적으로 최소자승법은 앞서 언급한 바와 같이 신호에 대한 잡음의 비가 클 경우 오차가 커 기술한 최소자승 방법과 함께 잡음에 둔감하고 오차를 줄일 수 있는 instrumental variable method (IVM) 를 추가로 사용한다. 이렇게 얻은 계수를 다시 피팅한 그림을 Fig. 6에 나타내었으며, Table 1은 측정 변수들을 나타낸다.

Fig. 7에서는 회전 속도와 가변전압에 따른 직렬 감쇠 계수를 나타낸 것이다. 일반적으로 가변 전압에 따라 감쇠 계수는 증가하는 추세를 보였는데 실제 사용했던 ER 유체 (Bayer 사, Type VPAI 3565)의 전압의 크기에 따른 전달응력의 크기 변화와 유사한 특성을 보였다. 또한 실험 결과 로터 회전수는 감쇠 계수에 크게 영향을 미치지 않음

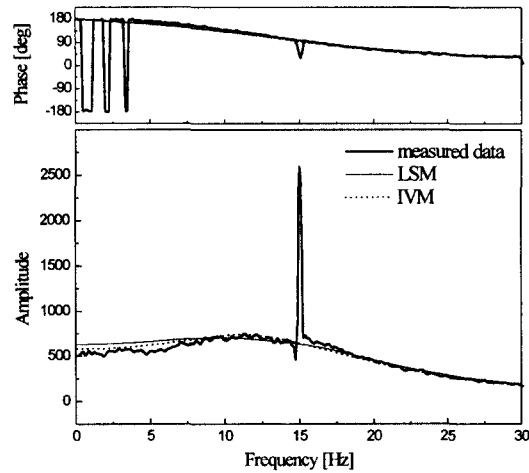


Fig. 6 Example of measured and analytical frequency response functions (900 rpm, 1.0 kV)

Table 1 Variable parameters of slotted ER SFD system

Parameters	Ranges
1) Supply voltages (kV/mm)	0, 0.5, 1.0
2) Rotating speed (rpm)	600~1800
3) Supply pressure (kPa)	100 kPa

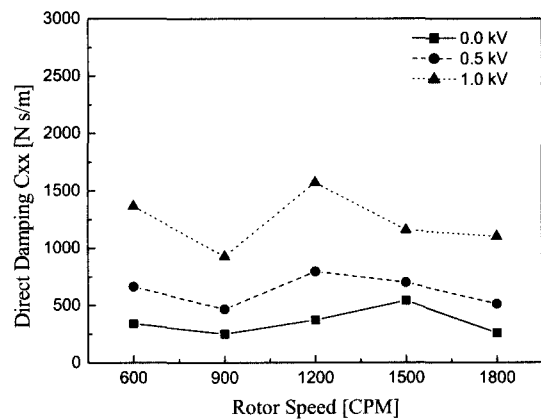


Fig. 7 Direct damping coefficients versus cpm with variation of supply voltages for slotted ER SFD

을 알 수 있으나 특히 전기장의 세기가 큰 1.0 kV 범위에서 비교적 큰 감쇠력의 변화 폭을 보였다. Fig. 8에서는 회전 속도와 가변전압에 따른 직렬 강성계수를 나타낸 것이다. 전압의 증가에 따라 직렬 강성 계수는 오히려 감소하였는데 이는 전단 응력이 증가함에 따라 감쇠력이 증가하는 반면 강성에 의한 힘은 상대적으로 감소하는 현상을 보였다. 이들 값 역시 회전 속도와는 무관함을 보이고 있다.

Fig. 9에서는 질량계수에 대한 측정값으로 반경 방향의 가속도, 과 관련된 유체의 관성력으로 회전 속도에 관계없

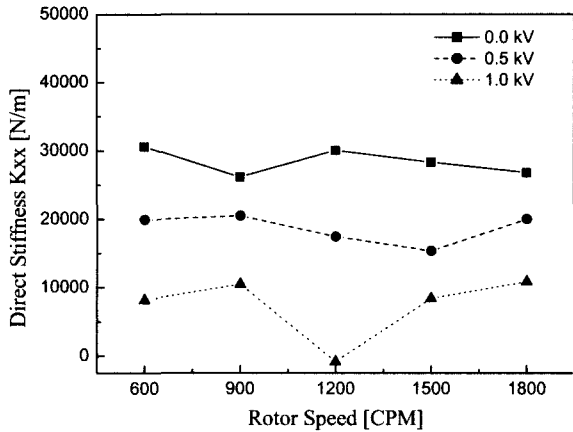


Fig. 8 Direct stiffness coefficients versus cpm with variation of supply voltages for slotted ER SFD

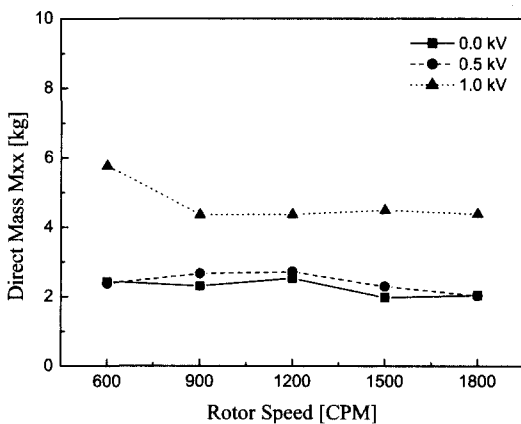


Fig. 9 Direct mass coefficients versus cpm with variation of supply voltages for slotted ER SFD

이 거의 일정한 값을 갖는다. 전기장의 세기가 0.5 kV까지는 거의 관성력에 의한 유체 효과가 없었으나 전기장의 세기가 1.0 kV로 증가함에 따라 관성력이 급격히 증가함을 보였다. 이는 ER 유체의 전기장에 따른 항복전단 응력이 커짐에 따라 유체가 고체화하여 전단력이 상대적으로 커지고 또한 관성력도 급격히 증가함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문은 전기 유변성 유체로 지지되는 스퀴즈 필름 댐퍼의 동적 계수를 추출하고자 실험적인 방법인 최소 자승법과 전기적인 잡음에 비교적 둔감한 instrumental variable method에 의하여 파라미터를 추출하고, 또한 가변 전압이 시스템의 동적 계수에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가변 전압의 크기에 따라 댐퍼의 감쇠 계수는 증가하는

추세를 보인 반면 강성 계수는 오히려 감소하는 현상을 나타내었다. 특히 관성 계수 및 감쇠 계수는 고전압이 발생할 때 급격히 증가함을 알 수 있었고, 회전수와는 무관하였다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Vance, J. M., 1988, "Rotordynamics of Turbomachinery", John Wiley & Sons, Inc. New York.
- (2) Gunter, E. J., Barrett, L. E. and Allaire, P. E., 1977, "Design of Nonlinear Squeeze Film Dampers for Aircraft Engines", Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME, Vol.99, No.1, pp. 57~64.
- (3) Kim, C. H. et al., 1998, "Vibration Control of a Pressurized, Sealed, ER Fluid SFD supported rotor", 7th ISROMAC Conference, pp.238~247.
- (4) 최상호, 1996, "가압 밀봉된 스퀴즈 필름 댐퍼로 지지된 로터의 동특성 연구", 고려대학교, 석사학위 논문집, 1996.
- (5) Shulman, J. P., Gordkin, R. G., Korobko, E. V., and Gleb, V. K., 1981, "The Electro-rheological Effect and its Possible Uses", J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 8, pp. 29~41.
- (6) Jordan, T.C. and Shaw, M. T., 1989, "Electrorheology", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 5, pp. 849~878.
- (7) Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., 1990, "An Electroviscous Damper for Rotor Applications", J. of Vibration and Acoustics, Vol. 112, pp. 440~443.
- (8) Jung, S. Y. and Choi, S. B., 1995, "Analysis of a Short Squeeze Film Damper Operating with Electrorheological Fluids", STLE Tribology Trans. Vol. 38, No. 4, pp. 857~862.
- (9) 정시영, 최상규, 강덕형, 1997, "소폭 전기유변 스퀴즈 필름 댐퍼에 관한 이론적 근사해", 한국윤활학회지, 제 13권, 제2호, pp. 60~67.
- (10) Tichy, J. A., 1993, "Behavior of a Squeeze Film Damper with an Electrorheological Fluid", STLE Tribology Trans. Vol. 36, No. 1, pp. 127~133.

(11) Morishita, S. and Mitsui, J., 1992, "Controllable Squeeze Film Damper (An Application of Electro-Rheological Fluid)", J. of Vibration and Acoustic, Vol. 114, pp. 354~357.

(12) 김창호, 이용복, 정시영, 1999, "축 진동 감쇠 장치", 대한민국 특허 출원 중.

(13) Lee, Yong-Bok., Lee, Nam-Soo., Kim, Chang-Ho., Jung, Si-Young., 1999, "Test Results for Vibration Control of an Overhung Flexible Rotor Supported by a Discharge Free Slot Electro-rheological Squeeze Film

Damper." Asia-Pacific Vibration Conference '99, pp. 484~489.

(14) Kim, C. H. et al., 1999, "Test Results for Vibration Control of an Overhung Rigid Rotor Supported by a Sealed and Electro-rheological Fluid Squeeze Film Damper", International Conference on the Integration of Dynamics, Monitoring and Control.

(15) 이용복, 김창호, 최동훈, 1996, "IV 방법을 이용한 잡음이 포함된 베어링 실험 장치의 동특성 파라미터 추출", 한국소음진동공학회지, 제 6권 제 5호, pp. 679~684.